

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕННЫХ СОСТОЯНИЙ ^{151}Gd ПРИ РАСПАДЕ ^{151}Tb ($T_{1/2} = 16,4$ час)

EXCITED STATES ^{151}Gd FROM THE DECAY OF ^{151}Tb ($T_{1/2} = 16.4$ h)

Н. Б. Бадалов**, А. Будзяк***, Ц. Вылов, Ким Зай Те, В. В. Кузнецов, Ли Су Чен,
А. А. Марчук, Ш. Оманов**

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна*

(Поступила в редакцию 24-го июня 1981 г.)

Excited states in ^{151}Gd have been studied through the (e.c. + β^+)-decay of ^{151}Tb (16.4 h). The activity was produced through spallation of Ta with 660 MeV protons at JINR and was isolated using chemical and ion-separation techniques. The gamma-ray and electron spectra have been investigated with the help of spectrometers with Ge(Li)- and Si(Li)-detectors. The e-gamma-coincidence spectra were studied by means of a setup based on toroidal beta-spectrometer and spectrometer with Ge(Li)-detector, from conversion electron lines K108.1, K180.2, K192.1, K251.9, K287.2 and K426.6. The decay scheme of $^{151}\text{Tb} \rightarrow ^{151}\text{Gd}$ is proposed and discussed.

PACS numbers: 21.10.-k, 21.10.Ma

1. Введение

Радиоактивный распад ^{151}Tb исследовался ранее в работах [1-15]. Возбужденные состояния ^{151}Gd изучались также в ядерных реакциях (d, p), (d, t) [16, 20], (α , 2n γ) [17], (α , 3n γ) [18, 19] и (^3He , α) [20].

Несмотря на то, что в ряде работ при исследовании излучения ^{151}Tb применялись различные спектроскопические методы с использованием полупроводниковых детекторов (ППД), магнитных спектрометров, а также установок γ - γ -, e-e-совпадений, схема распада этого нуклида была решена недостаточно полно, в ряде

* Адрес: Объединенный институт ядерных исследований, Главпочтамт п/я 79, Москва, СССР.

** Адрес: Самаркандский Государственный Университет, Самарканд, СССР.

*** Постоянный адрес: Instytut Fizyki UJ, Reymonta 4, 30-059 Kraków, Poland.

случаев наблюдаются неоднозначности в размещении отдельных гамма-переходов и ненадежно введенные уровни ^{151}Gd .

С целью уточнения схемы распада ^{151}Tb : энергий, интенсивностей гамма-переходов и соответственно баланса интенсивностей и энергий уровней ^{151}Gd нами исследовались спектры e - γ -совпадений, γ -лучей и электронов внутренней конверсии (ЭВК) при распаде ^{151}Tb .

2. Приготовление радиоактивных источников

Радиоактивные источники тербия получались в реакциях глубокого расщепления тантала (эрбия) протонами с энергией 660 МэВ.

Мишени облучались на внутреннем пучке синхротрона ЛЯП Объединенного института ядерных исследований. Из облученных мишеней радиохимическим методом [21] выделялся тербий. Моноизотопные источники ^{151}Tb получались путем внедрения ионов в алюминиевую фольгу толщиной 4,85 мг/см² при помощи электромагнитного масс-сепаратора [22, 23]. Источники для измерений приготавливались по методике, описанной в работах [24, 25].

3. Измерение спектров гамма-лучей

Измерения спектров гамма-лучей ^{151}Tb проводились на спектрометрах с Ge-и Ge(Li)-детекторами. Методика измерений и обработки спектров гамма-лучей подробно изложена в работе [24].

Низкоэнергетическая часть спектра гамма-лучей ($E_\gamma < 300$ кэВ) изучалась при помощи спектрометров с ППД-Ge-детектором (100 мм² × 7 мм) и Ge(Li)-детектором (200 мм² × 5 мм) с энергетическим разрешением 500 и 550 эВ при $E_\gamma = 122$ кэВ ^{57}Co , соответственно. Спектр гамма-лучей в области больших энергий измерен на спектрометрах с использованием трех Ge(Li)-детекторов с чувствительными объемами 37,0; 38,0; 50,0 см³ и энергетическим разрешением 2,1; 1,9; 2,1 кэВ при $E_\gamma = 1332$ кэВ ^{60}Co , соответственно. Характерные аппаратные спектры гамма-лучей, измеренные нами приведены в приложении [26] работы [27]. Экспериментальные данные, полученные из анализа 28 серий измерений спектров гамма-лучей ^{151}Tb , представлены в таблице I. Как видно из таблицы I, с высокой точностью определены относительные интенсивности рентгеновских лучей, энергии и интенсивности гамма-лучей, обнаружены впервые 43 малоинтенсивных гамма-перехода в области энергий от 200 до 2100 кэВ, нами не наблюдаемы гамма-переходы с энергией 212,1 [12] и 103,8; 118,2; 217,0; 222,0; 255,4; 258,1; 267,0; 348,0; 413,9; 440,2; 539,0; 770,1; 773,2; 901,9; 1003,2; 1069,0; 1084,0; 1130,0; 1360,0; 1593,0; 1644,0; и 1727,5 кэВ [5, 10]. Точность определения значений энергий гамма-переходов для интенсивных ($> 5,0$ отн. ед. табл. I) не хуже 20 эВ, для малоинтенсивных ($< 5,0$ отн. ед.) не более 150 эВ, что существенно точнее результатов работ [5, 10, 12], уточнены также относительные интенсивности гамма-лучей по сравнению с работами [10, 12].

ТАБЛИЦА I

Энергии, относительные интенсивности γ -лучей и ЭВК, коэффициенты внутренней конверсии, мультипольности и размещение переходов при распаде ^{151}Tb

E_γ (ΔE), кэВ	I_γ (ΔI_γ)	I_K (ΔI_K)	α_K ($\Delta \alpha_K$) $\cdot 10^4$	σ_L	$E_{\text{уп}}^H$	$E_{\text{уп}}^K$
1	2	3	4	5	6	7
$K_{\alpha 2}$	119.8 (26)	—	—	—	—	—
$K_{\alpha 1}$	209.9 (41)	—	—	—	—	—
$K_{\beta 1}$	64.9 (15)	—	—	—	—	—
$K_{\beta 2}$	16.8 (4)	—	—	—	—	—
108.123 (10)	87.6 (17)	1050 (51)	11256 (590)	M1 + 50% E2	108.123	0
139.99 (5)	0.14 (5)	—	—	—	1192.232	1052.239
148.734 (30)	0.55 (8)	—	—	—	—	—
149.00 (5)	0.75 (11)	—	—	—	575.691	426.718
160.759 (10)	1.88 (7)	5.1 (13)	2548 (654)	E2	587.478	426.718
180.193 (9)	42.3 (8)	147 (4)	3263 (108)	M1	575.691	395.494
191.981 (7)	13.50 (26)	42.6 (14)	2963 (113)	M1	587.478	395.494
224.85 (16)	0.32 (4)	—	—	—	—	—
236.20 (5)	0.30 (4)	0.64 (19)	2024 (656)	M1	811.883	575.691
239.56 (9)	0.71 (8)	0.74 (9)	979 (162)	E2	1745.09	1505.526
248.236 (17)	0.82 (9)	—	—	—	1087.589	839.360
251.882 (7)	95.9 (18)	133.8 (28)	$\equiv$ 1310	M1	839.360	587.478
263.648 (19)	0.75 (10)	0.51 (16)	638 (224)	E2	839.360	575.691
287.372 (11)	100.0 (20)	100.0 (32)	939 (36)	M1	395.494	108.123
318.595 (12)	1.30 (14)	0.64 (18)	462 (138)	E2	426.718	108.123
354.21 (12)	0.060 (33)	0.033 (6)	517 (218)	M1	—	—
368.90 (18)	0.028 (6)	—	—	—	1456.48	1087.589
375.0 (5)	0.06 (1)	0.03 (1)	461 (198)	M1	2115.99	1740.84
380.343 (9)	17.23 (35)	1.33 (17)	73 (10)	E1	1192.232	811.883
385.167 (10)	3.63 (9)	1.47 (6)	380 (18)	M1 + E2	811.883	426.718
395.494 (14)	38.7 (8)	8.9 (6)	216 (15)	E2	395.494	0
401.9 (5)	0.07 (4)	0.04 (2)	450 (357)	E2, M1	—	—
406.33 (16)	0.34 (8)	0.07 (3)	199 (88)	E2	2195.27	1788.91
416.385 (11)	6.88 (14)	2.52 (6)	344 (11)	M1	811.883	395.494
426.718 (16)	15.48 (34)	5.63 (13)	342 (11)	M1	426.718	0
443.865 (10)	38.5 (8)	11.46 (15)	280 (7)	M1 + E2	839.360	395.494
451.73 (9)	0.08 (1)	0.015 (8)	176 (97)	E2	—	—
460.451 (34)	0.18 (3)	—	—	—	—	—
467.566 (11)	3.39 (8)	0.48 (19)	133 (53)	E2	575.691	108.123
476.528 (18)	5.08 (31)	1.22 (8)	227 (21)	M1	1052.232	575.691
479.355 (13)	55.5 (11)	8.1 (9)	137 (15)	E2	587.478	108.123
500.109 (15)	1.65 (5)	0.30 (4)	171 (24)	M1 + E2	1087.589	587.478
508.2 (6)	0.12 (5)	0.029 (7)	227 (109)	M1	—	—
511.897 (17)	2.79 (20)	0.621 (34)	206 (94)	M1	1087.589	575.691
534.62 (4)	0.431 (21)	0.019 (4)	42 (9)	E1	—	—
537.242 (17)	1.97 (8)	—	—	—	1124.726	587.478
563.19 (5)	0.267 (22)	0.053 (6)	187 (26)	M1	1687.94	1124.726
572.5 (6)	0.073 (26)	0.006 (2)	77 (37)	E2	—	—
579.4 (5)	0.075 (11)	0.012 (4)	150 (55)	M1	—	—

ТАБЛИЦА I (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7
587.478 (12)	57.5 (32)	5.31 (34)	86 (8)	E2	587.478	0
604.743 (12)	12.04 (24)	0.34 (7)	27 (6)	E1	1192.232	587.478
616.541 (12)	37.3 (7)	1.22 (24)	31 (6)	E1	1192.232	575.691
620.356 (25)	1.45 (12)	0.104 (24)	67 (17)	E2	1745.09	1124.726
644.78 (14)	0.150 (29)	—	—	—	—	—
656.750 (24)	2.02 (5)	0.098 (38)	46 (19)	E2	1052.232	395.494
660.854 (23)	1.88 (5)	—	—	—	1087.589	426.718
671.69 (19)	0.148 (21)	0.016 (6)	102 (41)	M1	1937.39	1265.76
692.086 (15)	6.06 (14)	0.44 (12)	68 (19)	E2	1087.589	395.494
703.758 (13)	13.58 (29)	1.41 (6)	98 (5)	M1	811.883	108.123
727.43 (13)	0.89 (7)	0.066 (6)	70 (9)	M1 + E2	—	—
731.240 (15)	29.8 (7)	1.47 (7)	46 (3)	E2	839.360	108.123
748.86 (18)	0.084 (15)	—	—	—	—	—
762.464 (22)	1.21 (5)	0.023 (2)	18 (2)	E1	1157.964	395.494
765.91 (30)	0.092 (21)	—	—	—	1577.73	811.883
785.21 (12)	0.137 (20)	0.007 (2)	48 (15)	E2	—	—
794.07 (7)	0.344 (30)	0.022 (8)	60 (23)	M1, E2	1707.66	913.594
805.468 (18)	2.82 (8)	0.211 (10)	70 (4)	M1	913.594	108.123
811.884 (25)	0.693 (27)	0.024 (3)	33 (4)	E2	811.883	0
839.21 (11)	0.110 (17)	0.004 (1)	34 (10)	E2	1265.76	426.718
842.30 (6)	0.314 (24)	—	—	—	2034.56	1192.232
852.54 (4)	0.240 (21)	0.014 (2)	55 (6)	M1	—	—
865.070 (30)	0.542 (18)	0.030 (2)	52 (4)	M1	1778.753	913.594
870.19 (27)	0.107 (28)	0.007 (1)	62 (19)	M1	1265.76	395.494
873.87 (21)	0.10 (4)	—	—	—	—	—
880.76 (7)	0.431 (27)	—	—	—	1456.48	575.691
884.10 (6)	0.780 (35)	0.025 (35)	30 (3)	E2	1279.59	395.494
890.88 (37)	0.059 (21)	—	—	—	1978.35	1087.589
895.76 (13)	0.063 (22)	0.005 (1)	75 (30)	M1	1707.66	811.883
905.723 (21)	3.75 (9)	0.120 (3)	30 (3)	E2	1745.09	839.360
913.598 (39)	0.583 (25)	0.018 (2)	29 (4)	E2	913.594	0
918.04 (6)	0.213 (17)	—	—	—	1505.526	587.478
938.84 (4)	0.572 (39)	0.032 (4)	53 (8)	M1	—	—
946.98 (9)	0.367 (29)	0.014 (4)	36 (11)	E2, M1	2034.56	1087.589
957.09 (16)	0.191 (27)	0.006 (1)	30 (7)	E2	—	—
966.83 (13)	0.151 (28)	0.005 (1)	31 (9)	E2	1778.753	811.883
967.4 (6)	0.06 (6)	—	—	—	—	—
974.27 (6)	0.343 (31)	—	—	—	—	—
979.467 (33)	1.57 (5)	0.044 (3)	26 (2)	E2	1087.589	108.123
983.47 (17)	0.503 (25)	0.023 (2)	43 (4)	M1	2071.03	1087.589
990.20 (37)	0.086 (28)	—	—	—	1577.73	587.478
1009.845 (37)	0.606 (29)	0.024 (1)	37 (2)	M1	2097.43	1087.589
1025.21 (7)	0.709 (31)	0.027 (8)	36 (12)	M1	—	—
1029.75 (11)	0.373 (24)	—	—	—	1456.48	426.718
1050.61 (9)	0.576 (30)	0.010 (3)	16 (5)	E2	—	—
1052.20 (36)	0.220 (27)	—	—	—	1052.232	0

ТАБЛИЦА I (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7
1060.95 (30)	0.79 (7)	0.023 (4)	28 (6)	M1	1456.48	395.494
1078.88 (16)	0.276 (24)	—	—	—	1505.526	426.718
1087.55 (27)	0.041 (10)	—	—	—	1087.589	0
1091.08 (5)	0.225 (24)	—	—	—	—	—
1098.056 (33)	0.379 (17)	—	—	—	1937.39	839.360
1110.018 (26)	3.33 (7)	—	—	—	1505.526	395.494
1120.16 (18)	0.243 (20)	—	—	—	1707.66	587.478
1125.93 (21)	0.15 (5)	—	—	—	2391.75	1265.76
1131.95 (6)	0.266 (33)	—	—	—	1707.66	575.691
1151.00 (16)	0.128 (21)	—	—	—	1577.73	426.718
1157.625 (33)	0.664 (27)	0.024 (5)	34 (7)	M1	1265.76	108.123
1163.12 (17)	0.240 (37)	—	—	—	—	—
1171.45 (4)	2.24 (5)	0.070 (5)	29 (3)	M1	1279.59	108.123
1182.223 (35)	1.03 (5)	—	—	—	1577.73	395.494
1191.25 (5)	0.597 (26)	0.020 (4)	32 (7)	M1	1778.753	587.478
1195.22 (5)	0.47 (7)	—	—	—	2034.56	839.360
1203.14 (10)	0.132 (20)	0.004 (1)	28 (8)	M1	1778.753	575.691
1206.5 (6)	0.031 (16)	—	—	—	—	—
1213.24 (12)	0.236 (27)	—	—	—	1788.91	575.691
1217.74 (32)	0.250 (21)	—	—	—	—	—
1222.651 (26)	1.92 (5)	0.033 (4)	16 (2)	E2	2034.56	811.883
1231.67 (7)	0.289 (23)	—	—	—	2071.03	839.360
1237.1 (4)	0.109 (29)	—	—	—	—	—
1249.18 (18)	0.178 (21)	—	—	—	—	—
1259.13 (15)	0.314 (32)	0.009 (1)	27 (4)	M1	2071.03	811.883
1264.32 (26)	0.107 (22)	—	—	—	—	—
1269.9 (5)	0.069 (17)	—	—	—	—	—
1280.92 (6)	0.50 (5)	0.010 (1)	19 (3)	M1	1707.66	426.718
1297.52 (13)	0.138 (24)	—	—	—	—	—
1312.148 (31)	2.32 (6)	0.055 (5)	22 (2)	M1	1707.66	395.494
1319.88 (20)	0.100 (29)	—	—	—	1746.603	426.718
1339.42 (26)	0.072 (21)	—	—	—	2391.75	1052.232
1345.3 (6)	0.025 (11)	—	—	—	1740.84	395.494
1348.35 (5)	0.784 (25)	—	—	—	1456.48	108.123
1352.023 (37)	1.036 (29)	—	—	—	1778.753	426.718
1362.18 (5)	0.542 (33)	0.010 (3)	17 (5)	M1	1788.91	426.718
1369.48 (14)	0.189 (14)	—	—	—	—	—
1383.461 (34)	1.27 (4)	0.023 (3)	17 (3)	M1	2195.27	811.883
1397.33 (26)	0.264 (28)	—	—	—	1505.526	108.123
1410.16 (19)	0.120 (16)	0.003 (1)	24 (9)	M1	—	—
1447.05 (14)	0.222 (28)	—	—	—	2034.56	587.478
1450.62 (16)	0.238 (39)	—	—	—	—	—
1456.44 (13)	0.190 (29)	—	—	—	1456.48	0
1483.538 (37)	1.91 (6)	0.036 (7)	18 (4)	M1	2071.03	587.478
1495.326 (27)	0.888 (37)	—	—	—	2071.03	575.691
1509.8 (7)	0.071 (39)	—	—	—	2097.43	587.478

ТАБЛИЦА I (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7
1545.20 (9)	0.019 (9)	—	—	—	—	—
1555.78 (27)	0.122 (27)	—	—	—	—	—
1575.41 (21)	0.065 (9)	—	—	—	—	—
1579.83 (6)	0.135 (11)	—	—	—	1687.94	108.123
1585.20 (18)	0.050 (11)	—	—	—	—	—
1599.56 (8)	0.904 (22)	0.016 (5)	17 (5)	M1	1707.66	108.123
1606.97 (16)	0.116 (18)	—	—	—	—	—
1619.6 (5)	0.017 (6)	—	—	—	2195.27	575.691
1632.70 (14)	0.325 (13)	—	—	—	1740.84	108.123
1638.47 (10)	0.30 (4)	—	—	—	1746.603	108.123
1648.92 (26)	0.11 (6)	—	—	—	—	—
1670.61 (7)	2.25 (9)	0.038 (8)	16 (4)	M1	1778.753	108.123
1675.66 (27)	0.137 (20)	—	—	—	2071.03	395.494
1680.76 (10)	0.081 (27)	—	—	—	1788.91	108.123
1689.65 (15)	0.376 (15)	0.006 (1)	15 (3)	M1	—	—
1705.86 (33)	0.096 (8)	—	—	—	—	—
1720.48 (8)	0.237 (19)	—	—	—	2115.99	395.494
1746.5 (5)	0.094 (13)	—	—	—	1746.603	0
1748.61 (25)	0.061 (10)	—	—	—	—	—
1759.68 (24)	0.033 (6)	—	—	—	—	—
1778.72 (8)	0.335 (15)	—	—	—	1778.753	0
1810.25 (14)	0.044 (10)	—	—	—	—	—
1816.03 (7)	0.445 (35)	—	—	—	2391.75	575.691
1870.21 (7)	0.339 (14)	—	—	—	1978.35	108.123
1898.53 (18)	0.037 (10)	—	—	—	—	—
1902.64 (20)	0.040 (8)	—	—	—	—	—
1941.59 (16)	0.032 (10)	—	—	—	—	—
1956.3 (4)	0.022 (10)	—	—	—	—	—
1962.92 (24)	0.076 (9)	—	—	—	2071.03	108.123
1976.40 (4)	0.041 (16)	—	—	—	—	—
1996.31 (14)	0.058 (7)	—	—	—	2391.75	395.494
2020.93 (9)	0.076 (8)	—	—	—	—	—
2025.83 (13)	0.056 (7)	—	—	—	—	—
2065.11 (12)	0.054 (14)	—	—	—	—	—
2090.71 (23)	0.056 (4)	—	—	—	—	—
2097.35 (14)	0.061 (5)	—	—	—	2097.43	0

4. Измерение спектров электронов внутренней конверсии. Определение мультипольности гамма-переходов

Спектры ЭВК ^{151}Tb измерялись при помощи спектрометров с Si(Li)-детекторами (с разрешением $\Delta E = 1,0\text{--}1,5$ кэВ при $E_e = 150$ кэВ) и Si(Li)-детектором, помещенным в однородное магнитное поле ($E = 2,2$ кэВ при $E_e = 150$ кэВ). Характерные аппаратные спектры ЭВК, полученные нами, представлены в приложении [26] работы [27]. Результаты обработки спектров ЭВК представлены в таблице I. При исследовании спектров впервые определены относительные интенсив-

ности ЭВК переходов с энергиями 239,6; 476,5; 620,4; 656,8; 727,4; 794,1; 811,9; 839,2; 852,6; 865,1; 870,2; 895,8; 966,8; 983,5; 1025,2; 1157,6; 1203,1; 1222,7; 1259,1; 1599,6; 1689,7 кэВ, уточнены значения относительных интенсивностей К-конверсионных электронов-переходов 395,5; 443,9; 467,6; 479,4; 616,6 и 703,8 кэВ и определены мультипольности для многих гамма-переходов, для 21 из них впервые,

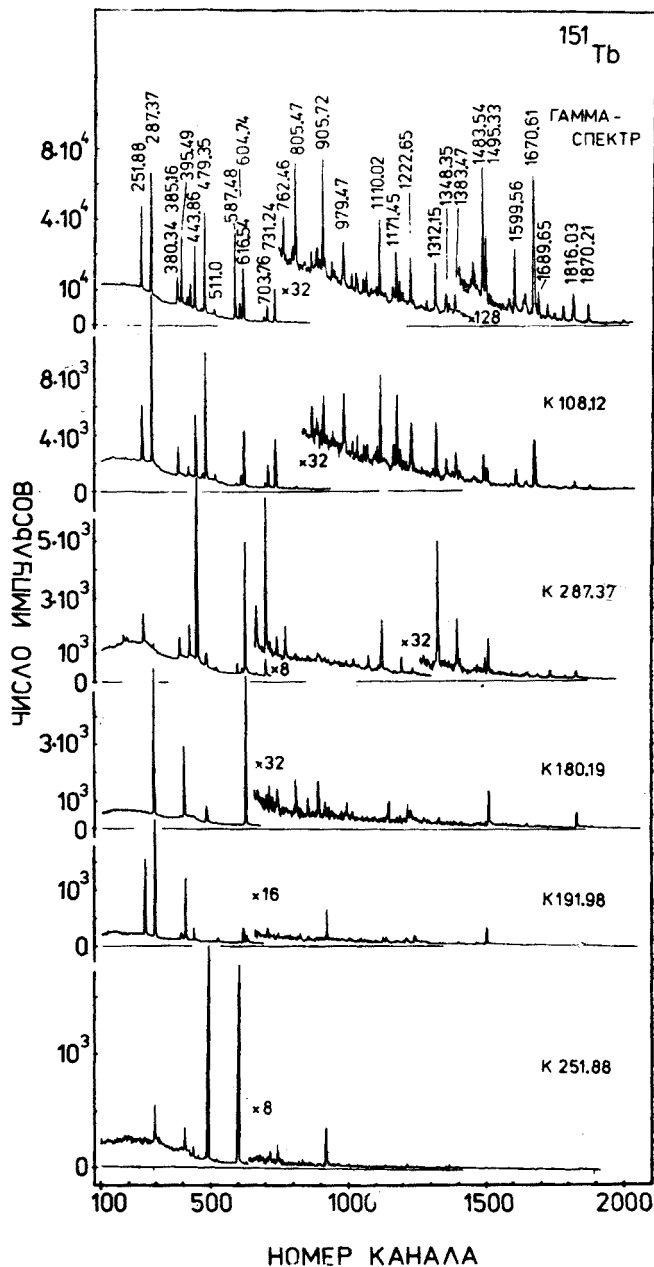


Рис. 1. Спектры γ -лучей ^{151}Tb и совпадений с ЭВК K108,12; K287,37; K180,19; K191,98 и K251,88

а именно: 239,6(E2), 476,5(M1), 620,4(E2), 656,8(E2), 727,4(M1 + E2), 794,1(M1, E2), 811,9(E2), 839,2(E2), 852,6(M1), 865,1(M1), 870,2(M1), 895,8(M1), 966,8(E2), 983,5(M1), 1025,2(M1), 1157,6(M1), 1203,1(M1), 1222,7(E2), 1259,1(M1), 1599,6(M1) и 1689,7 кэВ (M1). При определении значений α_k переходов принималось, что гамма-переход с энергией 251,9 кэВ типа M1 [3, 7] ($\alpha_k = 0,131$ [28]). Погрешности полученных значений α_k включают в себя погрешности относительных интенсивностей гамма-лучей и ЭВК, а также погрешность определения коэффициента нормировки для их вычисления. Полученные нами значения α_k и выводы о мультипольности гамма-переходов при распаде ^{151}Tb представлены в таблице I.

5. Исследование спектров е- γ -совпадений

Измерения спектров е- γ -совпадений проводились на установке [29], созданной на базе безжелезного бета-спектрометра с тороидальным магнитным полем и спектрометра с Ge(Li)-детектором. Разрешающее время быстрой схемы совпадений составляло $2\tau = 50$ нс.

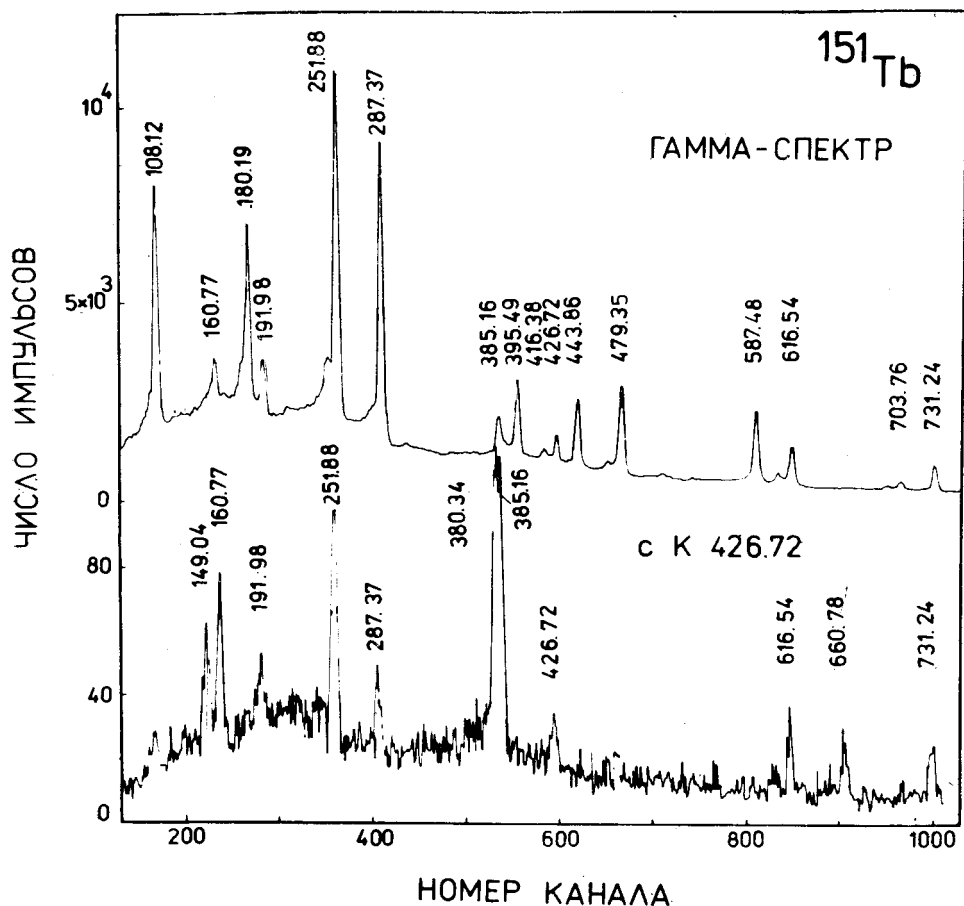


Рис. 2. Спектры γ -лучей ^{151}Tb и совпадений с ЭВК K426,72

ТАБЛИЦА II

Интенсивности совпадений γ -лучей с ЭВК К108,1 и К287,4 ^{151}Tb

E_γ , кэВ	К108,1			E_γ , кэВ	К108,1			К287,4		
	$I_{e-\gamma \text{ эксп}}$	$I_{e-\gamma \text{ расч}}$			$I_{e-\gamma \text{ эксп}}$	$I_{e-\gamma \text{ расч}}$		$I_{e-\gamma \text{ эксп}}$	$I_{e-\gamma \text{ расч}}$	
180.2	—	—		884.1	0.54 (19)	0.56 (5)		2.1 (7)	1.69 (20)	
192.0	—	—		905.7	1.47 (12)	1.56 (4)		—	—	
251.9	45.4 (15)	49 (4)		979.5	1.83 (24)	1.60 (5)		—	—	
287.4	100 (3)	100 (2)		1061.0	0.41 (13)	0.56 (5)		2.0 (4)	1.7 (3)	
380.4	13.3 (31)	13.1 (28)		1110.0	2.42 (26)	2.39 (4)		7.1 (5)	7.2 (8)	
416.4	4.7 (4)	5.1 (6)		1157.6	0.55 (10)	0.66 (2)		—	—	
443.9	26.6 (22)	27.6 (37)		1171.5	2.33 (19)	2.24 (5)		—	—	
467.6	2.9 (10)	3.4 (1)		1182.2	0.71 (16)	0.74 (4)		2.8 (6)	2.23 (26)	
479.4	53.7 (23)	55.4 (12)		1222.7	1.17 (12)	1.3 (5)		0.92 (9)	1.06 (13)	
500.1	0.95 (8)	0.85 (8)		1312.2	1.53 (13)	1.66 (7)		5.01 (37)	5.0 (6)	
511.9	8.3 (6)	3.0 (2)		1383.5	0.91 (10)	0.94 (4)		0.93 (11)	0.77 (9)	
604.8	6.03 (33)	6.23 (37)		1483.6	2.9 (5)	3.8 (5)		0.70 (16)	0.53 (7)	
616.6	25.6 (14)	27.0 (23)		1495.3	0.54 (7)	0.64 (3)		1.61 (37)	1.80 (20)	
656.8	1.28 (12)	1.45 (12)		1579.8	0.13 (4)	0.13 (1)		—	—	
692.1	4.18 (27)	4.35 (20)		1599.6	0.71 (8)	0.89 (3)		—	—	
703.8	12.4 (4)	13.5 (3)		1632.7	0.45 (17)	0.32 (1)		—	—	
731.3	28.0 (10)	29.8 (7)		1638.5	0.30 (9)	0.31 (4)		—	—	
762.5	0.98 (16)	0.87 (10)		1670.6	2.09 (31)	2.25 (9)		—	—	
805.5	2.74 (23)	2.82 (8)		1720.5	—	—		0.49 (11)	0.51 (6)	
865.1	0.53 (11)	0.54 (2)		1816.0	0.38 (10)	0.44 (4)		7.5 (12)	9.0 (10)	
				1870.2	0.21 (10)	0.33 (2)		—	—	

ТАБЛИЦА III

Интенсивности совпадений γ -лучей с ЭВК K192.0; K180.2; K251.9 и K426.7 ¹⁵¹Tb

E_{γ} , кэВ	K192.0		K180.2		K251.9		K426.7	
	$I_{e-\gamma}$ эксп	$I_{e-\gamma}$ расч	$I_{e-\gamma}$ эксп	$I_{e-\gamma}$ расч	$I_{e-\gamma}$ эксп	$I_{e-\gamma}$ расч	$I_{e-\gamma}$ эксп	$I_{e-\gamma}$ расч
149.0	—	—	—	—	—	—	3.81 (29)	2.43 (14)
160.8	—	—	—	—	—	—	13.1 (3)	12.4 (10)
251.9	100 (4)	100 (9)	—	—	—	—	—	—
287.4	105 (8)	104 (14)	100 (8)	100 (11)	—	—	—	—
380.4	—	—	1.55 (40)	1.01 (31)	26 (3)	24 (6)	—	—
385.2	—	—	—	—	—	—	100 (7)	100 (10)
395.5	40.1 (51)	35.6 (41)	36.4 (35)	38.7 (21)	12.9 (24)	9.3 (36)	47.9 (8)	49.2 (14)
426.7	—	—	—	—	4.8 (13)	3.7 (14)	—	—
479.4	—	—	—	—	100 (5)	100 (7)	—	—
500.1	1.27 (47)	1.73 (52)	—	—	—	—	—	—
511.9	—	—	0.89 (10)	0.73 (11)	—	—	—	—
537.3	1.27 (52)	2.05 (33)	—	—	—	—	—	—
587.5	—	—	—	—	108 (7)	103 (18)	—	—
604.8	13.1 (9)	12.5 (7)	—	—	—	—	—	—
616.6	—	—	81.7 (62)	91.4 (87)	—	—	—	—
660.9	—	—	—	—	—	—	—	—
880.8	—	—	0.52 (18)	0.83 (25)	—	—	—	—
905.7	1.95 (21)	2.01 (15)	—	—	4.9 (11)	5.08 (104)	23.1 (21)	26.3 (24)
1132.0	—	—	0.77 (8)	0.66 (17)	—	—	—	—
1213.3	—	—	0.62 (7)	0.62 (10)	—	—	—	—
1495.3	—	—	2.22 (19)	2.36 (21)	—	—	—	—
1816.0	—	—	0.87 (8)	0.94 (11)	—	—	—	—

В экспериментах исследовались совпадения гамма-лучей с ЭВК K180,2; K108,1; K192,1; K251,9; K287,2 и K426,6 ^{151}Tb . Спектры е- γ -совпадений при распаде ^{151}Tb представлены на рис. 1 и 2. Число случайных совпадений, наблюдаемых нами в экспериментах, не превышало 3% от числа истинных совпадений.

Информация о совпадениях накапливалась в памяти 4096-канального амплитудного анализатора icA-70. Обработка спектров е- γ -совпадений проводилась относительным методом, подробно описанным в работе [30] при помощи ЭВМ по программе „КАТОК“ [31].

Относительные интенсивности гамма-лучей, наблюдаемых в спектрах совпадений, приведены в таблице II и III, там же даны рассчитанные их значения на основании предложенной нами схемы распада ^{151}Tb .

6. Схема распада ^{151}Tb

На основании анализа спектров гамма-лучей, ЭВК и е- γ -совпадений предлагается схема распада $^{151}\text{Tb} \rightarrow ^{151}\text{Gd}$ (рис. 3 и 4, таблица IV).

Введение уровней ^{151}Gd , в основном, подкреплено наблюдаемыми е- γ -совпадениями. Энергии уровней рассчитывались с использованием всех комбинаций сумм и разностей энергий переходов для определенных состояний, при этом учитывались энергии отдачи ядра. Погрешности определения энергии уровней ^{151}Gd составляют 10–100 эВ.

В схеме распада ^{151}Tb размещено 113 переходов из 167 наблюдаемых. Суммарная интенсивность перемещенных переходов составляет примерно 2% на распад ^{151}Tb . При расчете значений $lgft$ разность масс $Q_{\beta+} = 2562(5)$ кэВ [13, 14], за 100% интенсивности на распад ^{151}Tb принята суммарная интенсивность переходов в основное состояние ^{151}Gd , равная 363(6) отн. ед. таблицы I.

Введенные в работах [10, 12] уровни с энергиями 743,2; 766,1; 775,3; 835,4; 853,0; 905,7; 957,2; 1001,0; 1216,1; 1298,7; 1349,5; 1392,6 кэВ [10] и 1232,4; 1676,5; 1798,0; 1975,3 кэВ [12] нами не подтверждены.

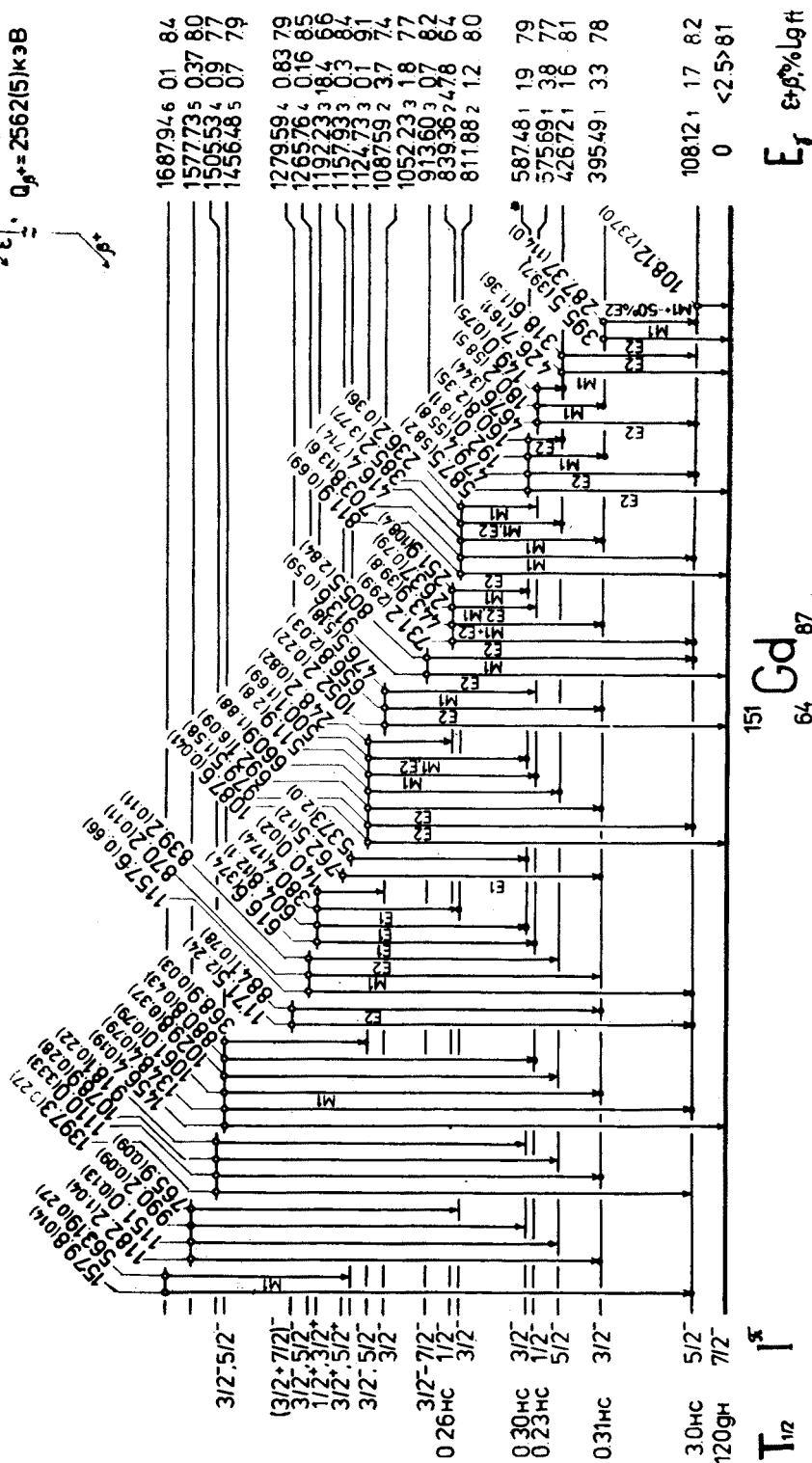
На основании анализа экспериментальных результатов введены дополнительно состояния ^{151}Gd с энергиями 1265,76(4), 1279,59(4), 1687,94(6), 1788,91(6), 2034,56(5), 2115,99(7), 2195,27(5) кэВ.

Уровень 1265,76 кэВ ($3/2^-$, $5/2^-$) введен на основании совпадений K108,1 с 1157,63 кэВ. Этот уровень разряжается переходами 1157,63 кэВ $\overline{\text{M1}}$, 870,19 кэВ M1 и 839,21 кэВ E2 на состояния 108,12 кэВ $5/2^-$, 395,49 кэВ $3/2^-$ и 426,72 кэВ $5/2^-$, соответственно.

Уровень 1279,59 кэВ ($3/2^-$, $7/2^-$) введен на основании е- γ -совпадений, его разряжают два перехода 1171,45 кэВ M1 и 884,1 кэВ E2 на уровни 108,12 кэВ $5/2^-$ и 395,50 кэВ $3/2^-$, соответственно.

Состояние с энергией 1687,94 кэВ введено на основании наблюдения (K108,12- γ 1579,83)-совпадений и оно разряжается переходами 563,19 кэВ M1 и 1579,83 кэВ.

Уровень 1788,91 кэВ ($3/2^-$ – $7/2^-$) разряжается переходами 1680,76 кэВ, 1362,18 кэВ M1 и 1213,24 кэВ.

Рис. 3. Схема распада ^{151}Tb , часть 1

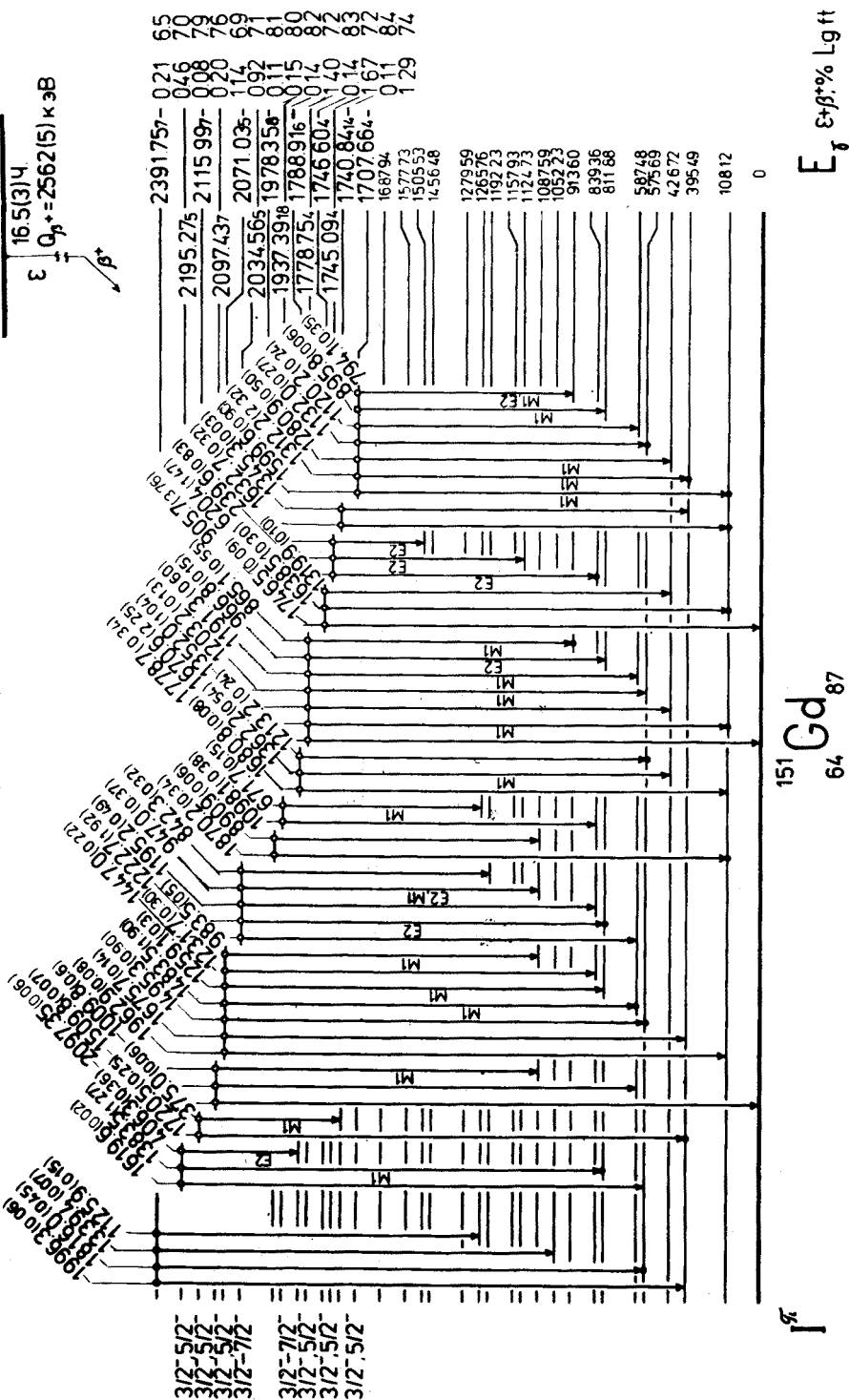


Рис. 4. Схема распада ^{151}Tb , часть 2

Данные о схеме распада $^{151}\text{Tb} \rightarrow ^{151}\text{Gd}$

$E_{\gamma\text{p}}$ ($\Delta E_{\gamma\text{p}}$)	I^{π}	$\varepsilon(\Delta\varepsilon)$ %на расп.	$\log ft$	Разрядка			
				E_{γ}	I^{π}	σL	$E_{\gamma\text{p}}$
1	2	3	4	5	6	7	8
0	7/2 ⁻	2.50 (7)	8.1	—	—	—	—
108.123 (7)	5/2 ⁻	1.7 (9)	8.2	108.123	237	M1 + 50% E2	0
395.494 (9)	3/2 ⁻	3.3 (4)	7.8	287.372	114	M1	108.123
				395.494	39.7	E2	0
426.718 (11)	5/2 ⁻	1.55 (12)	8.1	318.595	1.36	E2	108.123
				426.718	16.1	M1	0
575.691 (14)	1/2 ⁻	3.8 (5)	7.7	149.00	0.75	—	426.718
				180.193	58.5	M1	395.494
				467.566	3.44	E2	108.123
587.478 (13)	3/2 ⁻	1.9 (8)	7.9	160.759	2.35	E2	426.718
				191.981	18.1	M1	395.494
				479.355	55.8	E2	108.123
				587.478	58.2	E2	0
811.883 (18)	3/2 ⁻	1.20 (11)	8.0	236.20	0.36	M1	575.691
				385.167	3.77	M1 + E2	426.718
				416.385	7.14	M1	395.494
				703.758	13.6	M1	108.123
				811.884	0.70	E2	0
839.360 (18)	1/2 ⁻	47.8 (8)	6.4	251.882	108.4	M1	587.478
				263.648	0.79	E2	575.691
				443.865	39.8	M1 + E2	395.494
				731.240	29.9	E2	108.123
913.594 (25)	3/2 ⁻ —7/2 ⁻	0.70 (3)	8.2	805.468	2.84	M1	108.123
				913.598	0.59	E2	0
1052.232 (26)	3/2 ⁻	1.98 (11)	7.7	476.528	5.18	M1	575.691
				656.750	2.03	E2	395.494
				1052.20	0.22	—	0
1087.589 (23)	3/2 ⁻ , 5/2 ⁻	3.67 (7)	7.4	248.236	0.82	—	839.360
				500.109	1.68	M1 + E2	587.478
				511.897	2.80	M1	575.691
				660.854	1.88	—	426.718
				692.086	6.09	E2	395.494
				979.467	1.58	E2	108.123
				1087.55	0.041	—	0
1124.726 (26)		0.07 (4)	9.1	537.242	1.98	—	587.478
1157.964 (28)	3/2 ⁺ , 5/2 ⁺	0.34 (2)	8.4	762.464	1.21	E1	395.494
1192.232 (26)	1/2 ⁺ , 3/2 ⁺	18.43 (24)	6.6	139.99	0.19	—	1052.232
				380.343	17.4	E1	811.883
				604.743	12.1	E1	587.478
				616.541	37.4	E1	575.691
1265.76 (4)	3/2 ⁻ , 5/2 ⁻	0.16 (2)	8.6	839.21	0.11	E2	426.718
				870.19	0.11	M1	395.494
				1157.625	0.67	M1	108.123

ТАБЛИЦА IV (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8
1279.59 (4)	3/2--7/2-	0.83 (2)	7.9	884.10	0.78	E2	395.494
				1171.45	2.24	M1	108.123
1456.48 (5)	3/2-, 5/2-	0.72 (2)	7.9	368.90	0.03	—	1087.589
				880.76	0.43	—	575.691
				1029.75	0.37	—	426.718
				1060.95	0.79	M1	395.494
				1348.35	0.79	—	108.123
				1456.44	0.19	—	0
1505.526 (38)		0.90 (3)	7.7	918.04	0.22	—	587.478
				1078.88	0.28	—	426.718
				1110.018	3.33	—	395.494
				1397.33	0.27	—	108.123
1577.73 (5)		0.37 (1)	8.0	765.91	0.09	—	811.883
				990.20	0.09	—	587.478
				1151.00	0.13	—	426.718
				1182.223	1.04	—	395.494
1687.94 (6)		0.11 (1)	8.4	563.19	0.27	M1	1124.726
				1579.83	0.14	—	108.123
1707.66 (4)	3/2-, 5/2-	1.29 (3)	7.4	794.07	0.35	M1, E2	913.594
				895.76	0.065	M1	811.883
				1120.16	0.24	—	587.478
				1131.95	0.27	—	575.691
				1280.92	0.50	M1	426.718
				1312.148	2.32	M1	395.494
				1599.56	0.91	M1	108.123
1740.84 (14)		0.08 (1)	8.5	1345.3	0.03	—	395.494
				1632.70	0.33	—	108.123
1745.09 (4)	3/2-, 5/2-	1.67 (6)	7.2	239.56	0.83	E2	1505.526
				620.356	1.47	E2	1124.726
				905.723	3.76	E2	839.360
1746.603 (36)		0.14 (2)	8.3	1319.88	0.10	—	426.718
				1638.47	0.30	—	108.123
				1746.5	0.10	—	0
1778.753 (39)	3/2-, 5/2-	1.40 (4)	7.2	865.070	0.55	M1	913.594
				966.83	0.15	E2	811.883
				1191.25	0.60	M1	587.478
				1203.14	0.13	M1	575.691
				1352.023	1.04	—	426.718
				1670.61	2.25	M1	108.123
				1778.72	0.34	—	0
1788.91 (6)	3/2--7/2-	0.14 (1)	8.2	1213.24	0.24	—	575.691
				1362.18	0.54	M1	426.718
				1680.76	0.08	—	108.123
1937.39 (18)		0.15 (1)	8.0	671.69	0.15	M1	1265.76
				1098.056	0.38	—	839.360
1978.35 (8)		0.11 (1)	8.1	890.88	0.06	—	1087.589
				1870.21	0.34	—	108.123
2034.56 (5)	3/2--7/2-	0.92 (3)	7.1	842.30	0.32	—	1192.232

ТАБЛИЦА IV (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8
2071.03 (5)	3/2 ⁻ , 5/2 ⁻	1.14 (3)	6.9	946.98	0.37	E2, M1	1087.589
				1195.22	0.47	—	839.360
				1222.651	1.92	E2	811.883
				1447.05	0.22	—	587.478
				983.47	0.51	M1	1087.589
				1231.67	0.29	—	839.360
				1259.13	0.32	M1	811.883
				1483.538	1.91	M1	587.478
				1495.326	0.89	—	575.691
2097.43 (7)	3/2 ⁻ , 5/2 ⁻	0.20 (1)	7.6	1675.66	0.14	—	395.494
				1962.92	0.08	—	108.123
				1009.845	0.61	M1	1087.589
				1509.8	0.07	—	587.478
				2097.35	0.06	—	0
2115.99 (7)	3/2 ⁻ , 5/2 ⁻	0.08 (1)	7.9	375.0	0.06	M1	1740.84
1720.48		0.24	—	395.494			
2195.27 (5)	3/2 ⁻ , 5/2 ⁻	0.50 (3)	7.0	406.33	0.36	E2	1788.91
2391.75 (7)	3/2 ⁻ , 5/2 ⁻	0.21 (2)	6.5	1383.461	1.27	M1	811.883
				1619.6	0.017	—	575.691
				1125.93	0.16	—	1265.76
				1339.42	0.07	—	1052.232
				1816.03	0.45	—	575.691
				1996.31	0.06	—	395.494

Уровни 2034,56 кэВ ($3/2^- - 7/2^-$), 2115,99 кэВ и 2195,27 кэВ введены также на основании ϵ - γ -совпадений; первый из них разряжается переходами 1447,05 кэВ, 1222,65 кэВ E2, 1195,22 кэВ, 946,98 кэВ E2, M1 и 842,3 кэВ; второй — 1720,48 кэВ и 375,0 кэВ M1; третий — 1619,6 кэВ, 1383,46 кэВ M1 и 406,33 кэВ E2.

Спины и четности возбужденных состояний ^{151}Gd определены нами в основном, по данным о мультипольностях гамма-переходов, выводы о которых для нижних состояний вплоть до уровня 587,48 кэВ совпадают с данными предыдущих работ [10–12, 32].

Следует обратить внимание особо на уровень с энергией 839,36 кэВ. При исследовании угловых корреляций направлений при распаде ^{151}Tb авторами работы [32] этому уровню приписываются спин и четность $1/2^-$. В других работах, выполненных ранее, в том числе в [11] по исследованию угловых корреляций направлений, этому состоянию приписаны спин и четность $3/2^-$. Как видно из таблицы I и схемы распада ^{151}Tb (рис. 3 и 4, таблица IV), нами наблюден гамма-переход с энергией 839,2 кэВ типа E2. С одной стороны, если предположить, что он разряжает состояние 839,36 кэВ, то этому уровню следует приписать однозначно спин и четность $3/2^-$. С другой стороны, по энергетическим соображениям этот переход можно разместить между уровнями 1265,75 и 426,72 кэВ. Однако в спектре совпадений гамма-лучей с ЭВК K426,72 из-за недостаточной статистики мы не обнаружили гамма-лучей

этого перехода. Мы могли бы обнаружить эти совпадения только в случае $I_{739} \geq 0,3$ (отн. ед. таблицы I).

Наблюдение совпадений ($K426,7 \gamma 731,2$) указывает на существование перехода с интенсивностью 1,5(4) отн. ед. с энергией близкой к энергии интенсивного перехода 731,24 кэВ ($I_\gamma = 29,9$ отн. ед.). Обнаруженный переход следует разместить между уровнями 1157,93 и 426,72 кэВ.

Спин ^{151}Tb $I = 1/2$ определен экспериментально авторами работы [33]. Основное состояние ^{151}Tb интерпретируется ими как одночастичное нильссоновское состояние $1/2^-$ [550].

Согласно исследований Экстрема и др. [34], модели оболочек Майер и сравнению с соседними ядрами ($^{143}\text{Nd}_{83}$, $^{145}\text{Sm}_{83}$, $^{145}\text{Nd}_{85}$, $^{147}\text{Sm}_{85}$ и $^{149}\text{Sm}_{87}$) основному состоянию ^{151}Gd следует приписать спин и четность $7/2^-(f7/2)$.

^{151}Gd находится на границе области деформированных ядер, где проявляются свойства, присущие как сферическим, так и деформированным нуклидам. В литературе имеется ряд предложений для объяснения свойств этого ядра. Первые из них были сделаны в работах [10–12], они относились в основном к интерпретации нижних возбужденных состояний ^{151}Gd .

Из систематики ротационных и квазиротационных полос четно-четных изотопов самария и гадолиния Хаммарен и др. [12] сделали заключение о наличии небольшой деформации у ядра ^{151}Gd $-0,12 \leq \beta_2 \leq 0,17$.

Аликовым и др. [35] были рассчитаны полные энергии нечетных изотопов тербия с $A = 149$ –157 по методу Струтинского с учетом оболочечной поправки в зависимости от квадрупольной и гексадекапольной деформаций для нижних одночастичных состояний. Авторы [35] делают вывод, что ^{151}Tb в основном состоянии имеет небольшую деформацию $\beta_2 = -0,1$.

Однако, удовлетворительного теоретического описания свойств возбужденных состояний ^{151}Gd пока не имеется.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] J. W. Michelich, B. Harmatz, T. H. Handley, *Phys. Rev.* **108**, 989 (1957).
- [2] Н. М. Антоньева и др., *ДАН СССР* **119**, 241 (1958).
- [3] B. Harmatz, T. H. Handley, J. W. Michelich, *Phys. Rev.* **128**, 1186 (1968).
- [4] А. Т. Стригачев и др., *Изв. АН СССР, сер. физ.* **25**, 813 (1961).
- [5] К. Вильский и др., *ЯФ* **6**, 672 (1967).
- [6] Б. С. Джелепов, П. А. Пишкин, И. А. Шишелов, Программа и тезисы докладов XXVII ежегодного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, Изд. Наука, Москва 1967, с. 59.
- [7] J. Kormicki et al., *Nucl. Phys.* **A100**, 297 (1967).
- [8] А. Баланда и др., *Acta Phys. Pol.* **36**, LO99 (1969).
- [9] В. А. Морозов, Т. М. Муминов, В. И. Разов, Препринт ОИЯИ 6-4406, Дубна 1969.
- [10] М. Гонсиор и др., *Acta Phys. Pol.* **B2**, 307 (1971).
- [11] Я. Ваврышук и др., *Изв. АН СССР, сер. физ.* **36**, 757 (1972).
- [12] E. Hammarén et al., *Z. Phys.* **A272**, 341 (1975).
- [13] И. И. Громова и др., Тезисы докладов XXVII ежегодного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, Изд. Наука, Ленинград 1977, с. 78.

- [14] Т. Крецу и др., *Изв. АН СССР, сер. физ.* **41**, 2032 (1977).
- [15] А. Будзяк и др., Препринт ОИЯИ Д6-11574, Дубна 1978, с. 121.
- [16] P. O. Tjom, B. Elbek, *Mat. Fys. Medd. Dan. Vidensk. Selsk.* **36**, 9 (1967).
- [17] H. J. Smith et al., *Phys. Rev. Lett.* **31**, 944 (1973).
- [18] P. Kleinheinz et al., *Phys. Rev. Lett.* **32**, 68 (1974).
- [19] P. Kleinheinz et al., *Nucl. Phys.* **A283**, 189 (1972).
- [20] G. Lovhoiden, D. G. Burke, *Can. J. Phys.* **53**, 1182 (1975).
- [21] Ф. Молнар, В. А. Халкин, Э. Херрманн, *ЭЧАЯ* **4**, 1077 (1973).
- [22] В. П. Афанасьев и др., Препринт ОИЯИ 13-4763, Дубна 1969.
- [23] В. Жук и др., Препринт ОИЯИ 6-10058, Дубна 1976.
- [24] а) Ц. Вылов и др., В книге *Прикладная ядерная спектроскопия*, Атомиздат, Москва **8**, 43 (1978); б) Ц. Вылов, Б. П. Осипенко, В. Г. Чумин, *ЭЧАЯ* **9**, 1350 (1978).
- [25] К. Я. Громов и др., Препринт ОИЯИ Р13-10611, Дубна 1977, в книге *Прикладная ядерная спектроскопия*, Атомиздат, Москва **8**, 59 (1978).
- [26] Ц. Вылов и др., В книге *Спектры измерений радиоактивных нуклидов измеренные с помощью полупроводниковых детекторов*, ZfK-399, Rossendorf bei Dresden 1980.
- [27] Ц. Вылов и др., Под ред. К. Я. Громова в книге *Спектры излучений радиоактивных нуклидов*, Изд. ФАН, Ташкент 1980.
- [28] R. S. Hager, E. C. Seltzer, *Nucl. Data* **A4**, 1 (1968).
- [29] В. В. Кузнецов и др., Препринт ОИЯИ Р13-12810, Дубна 1979; В книге *Прикладная ядерная спектроскопия*, Атомиздат, Москва **10**, 269 (1980).
- [30] А. Будзяк и др., Препринт ОИЯИ Р6-80-668, Дубна 1980.
- [31] В. Гаджоков, *ПТЭ* **5**, 82 (1970).
- [32] Я. Ваврышук и др., Препринт ОИЯИ Р6-11133, Дубна 1977.
- [33] K. E. Adelroth, H. Nyqvist, A. Rosen, *Phys. Scripta* **2**, 96 (1970).
- [34] S. Ekstrom et al., *Phys. Scripta* **6**, 181 (1972).
- [35] Б. А. Аликов и др., Тезисы докладов XXVIII Совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, Наука, Ленинград 1978, с. 68.